



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ULB

Die physikalische Trocknung der Druckfarben in Hinsicht auf Trocknersysteme

Dosdoğru, Günay
(1969)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00013967>

License:



CC-BY 4.0 International - Creative Commons, Attribution

Publication type: Article

Division: 16 Department of Mechanical Engineering
16 Department of Mechanical Engineering

Original source: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/13967>

Die physikalische Trocknung der Druckfarben in Hinsicht auf Trocknersysteme

Main influence factors on the physical drying
of printing inks with regard to drying systems

Dieser Beitrag gibt einen Vortrag des Autors anlässlich der 10. Internationalen Konferenz der IARIGAI im Juni 1969 in Krems, Oesterreich, wieder.

Die Trocknung von Druckfarben erfolgt entweder vorwiegend durch chemische oder vorwiegend durch physikalische Veränderungen des aufgetragenen Farbfilms. Im folgenden wird nur von der physikalischen Trocknung gesprochen, weil der Konstrukteur nur diese im Hinblick auf eine Trockneroptimierung durch Berücksichtigung physikalischer Gesetzmäßigkeiten und durch geeignete Konstruktionen beeinflussen kann. Obwohl die Druckfarbe, bestehend aus Harzen, Pigmenten, Lösemitteln usw. ein sehr komplexes Trockengut ist, so hat sie bei der physikalischen Trocknung mit allen anderen Trockengütern zwei Vorgänge gemeinsam: erstens die Überführung von Flüssigkeit in den dampfförmigen Zustand und zweitens die Abführung des entstehenden Dampfes.

Unabhängig von der Art der Wärmezufuhr kann als Regel im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit und die Schonung des Trockengutes gesagt werden, daß möglichst nur soviel Wärme zugeführt werden sollte, wie in dem abgehenden Dampf fortgeführt wird. Diese Regel ist beim Entwurf eines Trockners für Druckmaschinen besonders zu beachten, weil hier der Bedruckstoff wegen der bekannten Schwierigkeiten - wie z. B. Passerungenauigkeiten usw. - so wenig wie möglich geheizt werden soll.

Die Trocknungstheorie, die die Koppelung zwischen Wärme- und Dampfbewegung beschreibt, erlaubt in erster Näherung auch für Druckfarben Gesetzmäßigkeiten abzuleiten. Für den Fall, daß der Ort der Dampfbildung die Oberfläche des nassen Gutes

ist, sind die Verhältnisse für viele verschiedene Trocknungsgüter theoretisch und experimentell seit mehr als 100 Jahren untersucht worden. Es ist also möglich, unter Beachtung der Ähnlichkeitsgesetze, von diesen Untersuchungen für einen flüssigen Farbfilm Gebrauch zu machen.

Im folgenden werden einige Ergebnisse der theoretischen Untersuchungen für den Fall der Toluolverdunstung mitgeteilt, die mit Hilfe eines umfangreichen Rechenprogrammes erzielt wurden. Auf die Wiedergabe der Theorie wird im Rahmen dieses Berichtes verzichtet. Eine kurze Erläuterung der den Berechnungen zugrunde gelegten Voraussetzungen soll jedoch gegeben werden. Für die Berechnungen wurde eine geschlossene flüssige Toluolschicht vorausgesetzt. Ferner war die Kenntnis sämtlicher Stoffwerte für das flüssige und das dampfförmige Toluol in Abhängigkeit von der Temperatur notwendig. Diese Werte wurden, soweit sie in internationalen Tabellenwerken zu finden waren, gesammelt. Einige unbekannte Werte bei bestimmten Temperaturen wurden durch Interpolation ermittelt.

Es ist bekannt, daß der Wärme- und Stofftransport sich in der Grenzschicht auf der Oberfläche der Flüssigkeit abspielt. Es ist ferner bekannt, daß bei größerer Konzentration in dieser Grenzschicht für den Wärme- und Stofftransport nicht nur die reinen Stoffwerte des Trägergases - in diesem Falle Luft - sondern die Stoffwerte für das Toluol-Luftgemisch maßgebend sind. Die Vernachlässigung dieser Tatsache führt bei einer theoretischen Berechnung zu falschen Ergebnissen. Aus diesem Grunde wurden den Berechnungen die nach den bekannten Mischregeln für Gase ermittelten Stoffwerte für das Toluol-Luftgemisch zugrunde gelegt. Ihre Berechnungen erfordern langwierige Iterationen, die nur mit Hilfe eines Computers durchgeführt werden können. Für die weiteren Berechnungen wurde die Luft als Wärmeträger zugrunde gelegt.

Es war zunächst notwendig, die sich bei einer gegebenen Lufttemperatur auf der Oberfläche des flüssigen Toluol einstel-

lende Oberflächentemperatur zu ermitteln. Das Ergebnis dieser Berechnungen ist in Bild 1 zu sehen. Dort ist die Lufttemperatur t_L in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur t_w aufgetragen. Der Partialdruck des Toluoldampfes P_{DL} in der Luft ist hierbei der veränderliche Parameter. Man sieht,

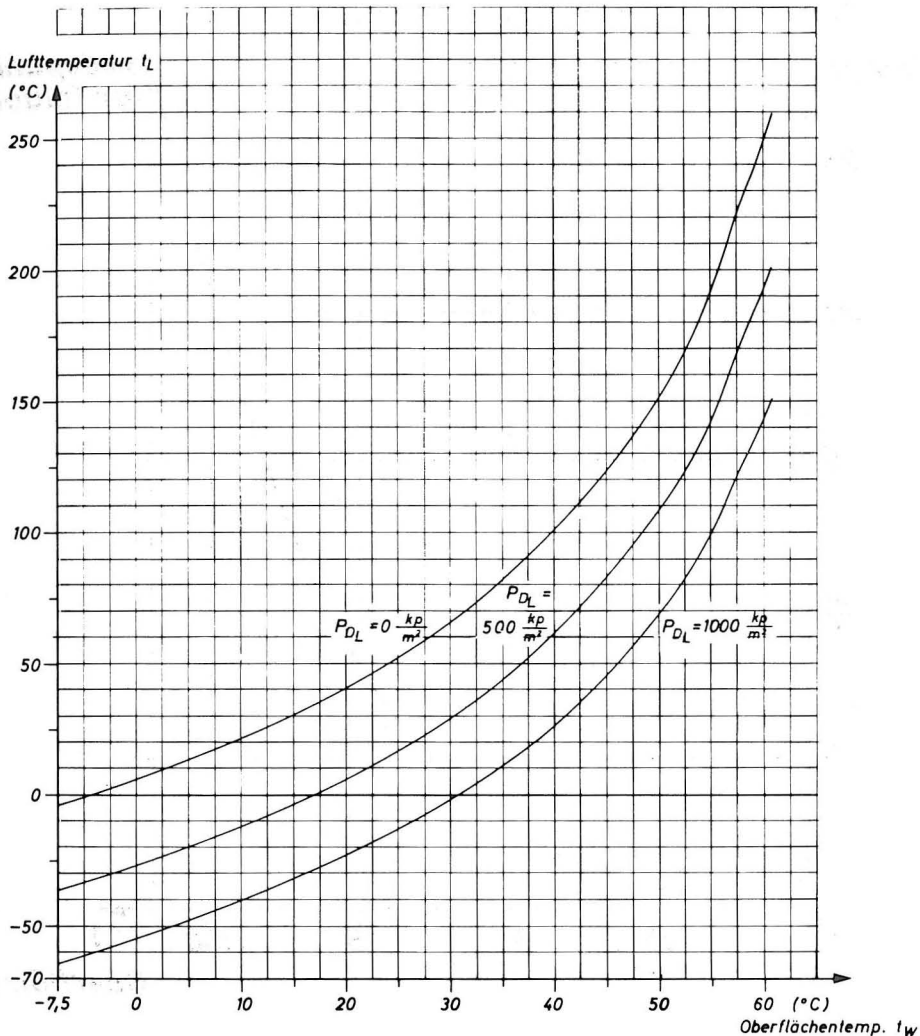


Bild 1 Oberflächentemperatur t_w einer flüssigen Toluolschicht bei verschiedenen Lufttemperaturen t_L und verschiedenen Dampfteildrücken P_{DL} unter Berücksichtigung der veränderlichen Stoffwerte für Toluol-Luft-Gemisch und unter der Annahme einer logarithmischen Verteilung in der Diffusionsschicht für Temperatur und Dampfteildruck.

daß bei einer gegebenen Lufttemperatur mit Zunahme des Partialdruckes - d. h. bei höheren Dampfkonzentrationen - auch die Oberflächentemperatur ansteigt.

Trockengeschw. g_D

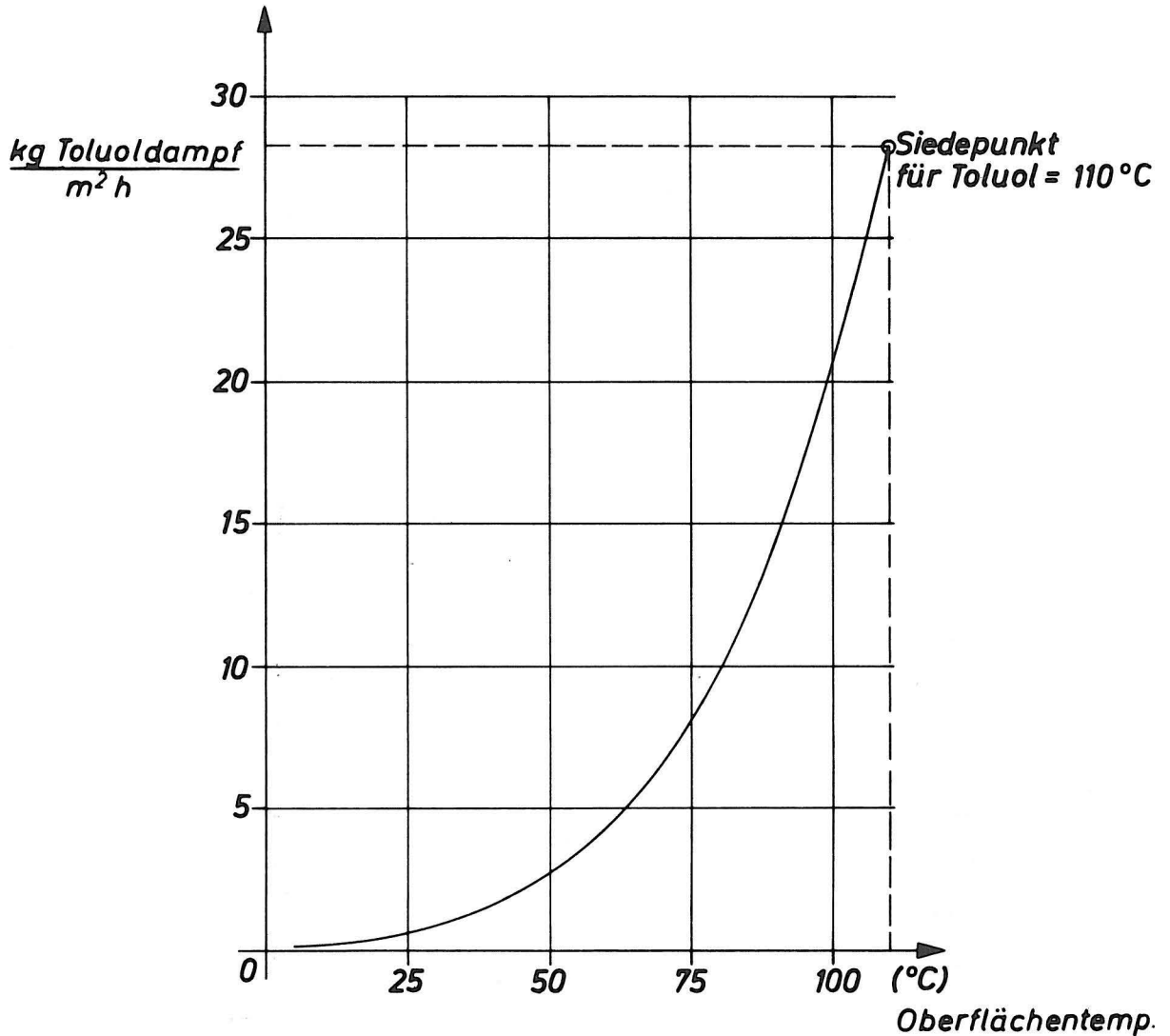


Bild 2 Trockengeschwindigkeit für Toluolverdunstung in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur in ruhender Luft für eine kreisförmige Trockenfläche mit $D = 2 \text{ m}$.

Vorerst soll die Frage behandelt werden, wie sich die Trockengeschwindigkeit in $\text{kg/m}^2 \text{ h}$ bei freier Konvektion mit der Erhöhung der Oberflächentemperatur ändert. Die Art der Wärmezufuhr ist für diese Betrachtung von untergeordneter Bedeutung.

Bild 2 zeigt die Ergebnisse der Berechnung. Die Kurve ist für eine kreisförmige Trockenfläche mit einem Durchmesser von $D = 2\text{m}$ gültig. Mit Erhöhung der Oberflächentemperatur steigt die Trockengeschwindigkeit erheblich an. Bei einer Oberflächentemperatur von 110°C , die dem Siedepunkt von Toluol entspricht, wird eine Trockengeschwindigkeit von etwa $28\text{ kg/m}^2\text{h}$ erreicht. Eine solch hohe Temperatur der Toluolschicht, der etwa auch die Temperatur der Oberfläche der Bedruckstoffe entsprechen würde, darf aus mehreren Gründen nie erreicht werden. Im Tiefdruckverfahren soll die Temperatur des Bedruckstoffes nach Möglichkeit $40 \dots 45^{\circ}\text{C}$ nicht überschreiten. In diesem Fall würde bei freier Konvektion eine sehr geringe Trockengeschwindigkeit erzielt werden. Eine Erhöhung der Trockengeschwindigkeit ist nur durch eine Verstärkung der Dampfbewegung durch zusätzliche Bewegung des Trägergases möglich. Wie nun diese zusätzliche Bewegung, also die erzwungene Konvektion, bei einer gegebenen Oberflächentemperatur die Trockengeschwindigkeit beeinflusst, zeigt Bild 3. Es stellt die Abhängigkeit der Trockengeschwindigkeit von der mittleren Luftgeschwindigkeit längs der Oberfläche und der Oberflächentemperatur dar. Um die Trockengeschwindigkeiten mit den in Bild 2 ermittelten Werten vergleichen zu können, wurde ebenfalls eine kreisförmige Fläche mit $D = 2\text{m}$ Durchmesser gewählt.

Für die Berechnung ist es notwendig, außer dem in Bild 1 gegebenen Zusammenhang zwischen Oberflächen- und Lufttemperatur in der Grenzschicht, noch den Strömungszustand zu kennen. Bekanntlich gibt es verschiedene Strömungsarten, wie z. B. tangential oder senkrechte Anströmung der zu trocknenden Oberfläche und im Falle einer senkrechten Anströmung Mehr- oder Einzel-Düsenanordnungen in Rund- oder Schlitzdüsenausführung. Diese Strömungsarten sind in der Literatur mehr oder weniger intensiv untersucht worden. Besonders die Strömung unter einer kreisrunden einzelnen Düse ist gut bekannt, zum Beispiel: Schrader [1]; Schlünder und Gnielinski [2]; Petzold [3]; Perry [4]. Aus diesem Grunde wurde sie den Berechnungen zugrunde gelegt.

Bild 3 erlaubt es, einige Feststellungen abzuleiten, die für die Beurteilung von Trocknersystemen von großer Bedeutung sind. Bei Strömungsgeschwindigkeiten längs der Oberfläche bis zu 10 m/s und im Grenzfall bei ruhender Luft ist die Trockengeschwindigkeit klein, auch wenn die Oberflächentemperatur gesteigert wird. Die Trockengeschwindigkeiten liegen maximal bei

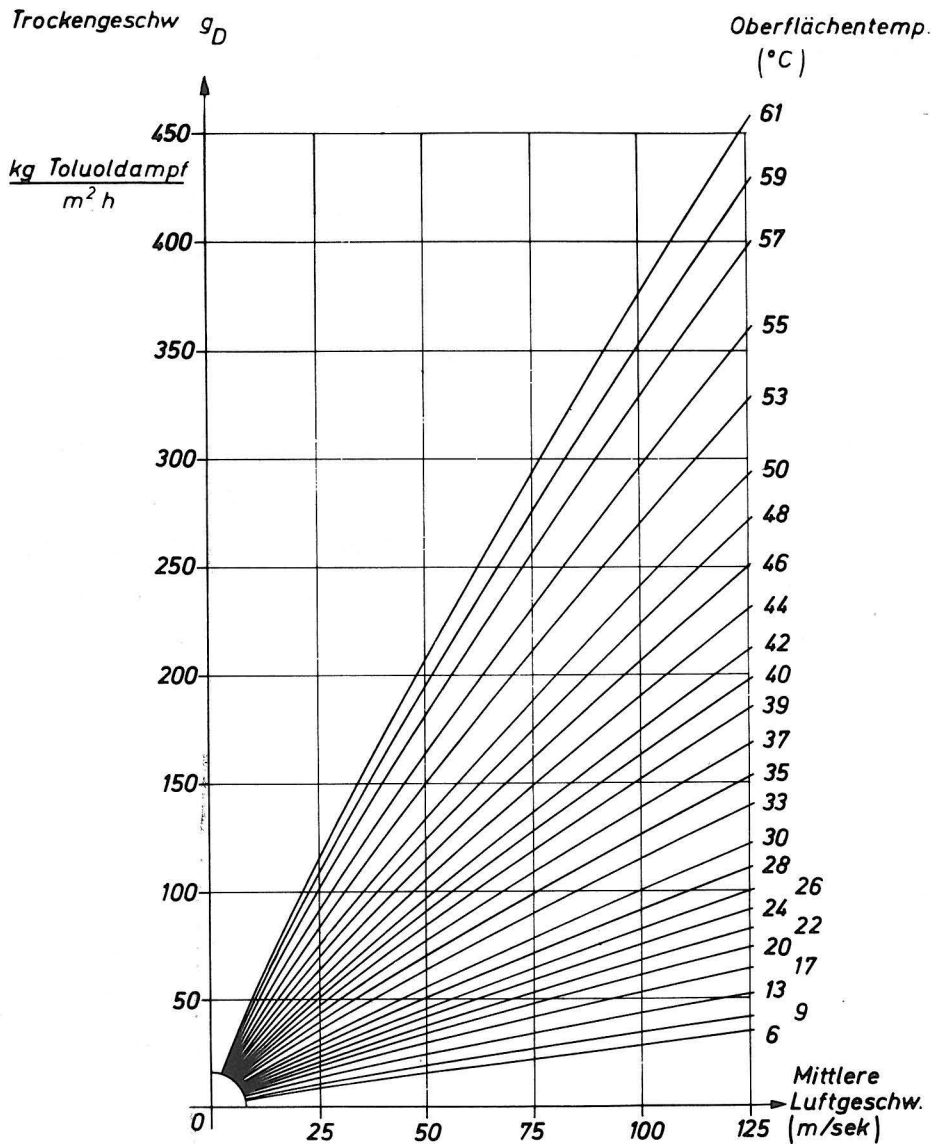
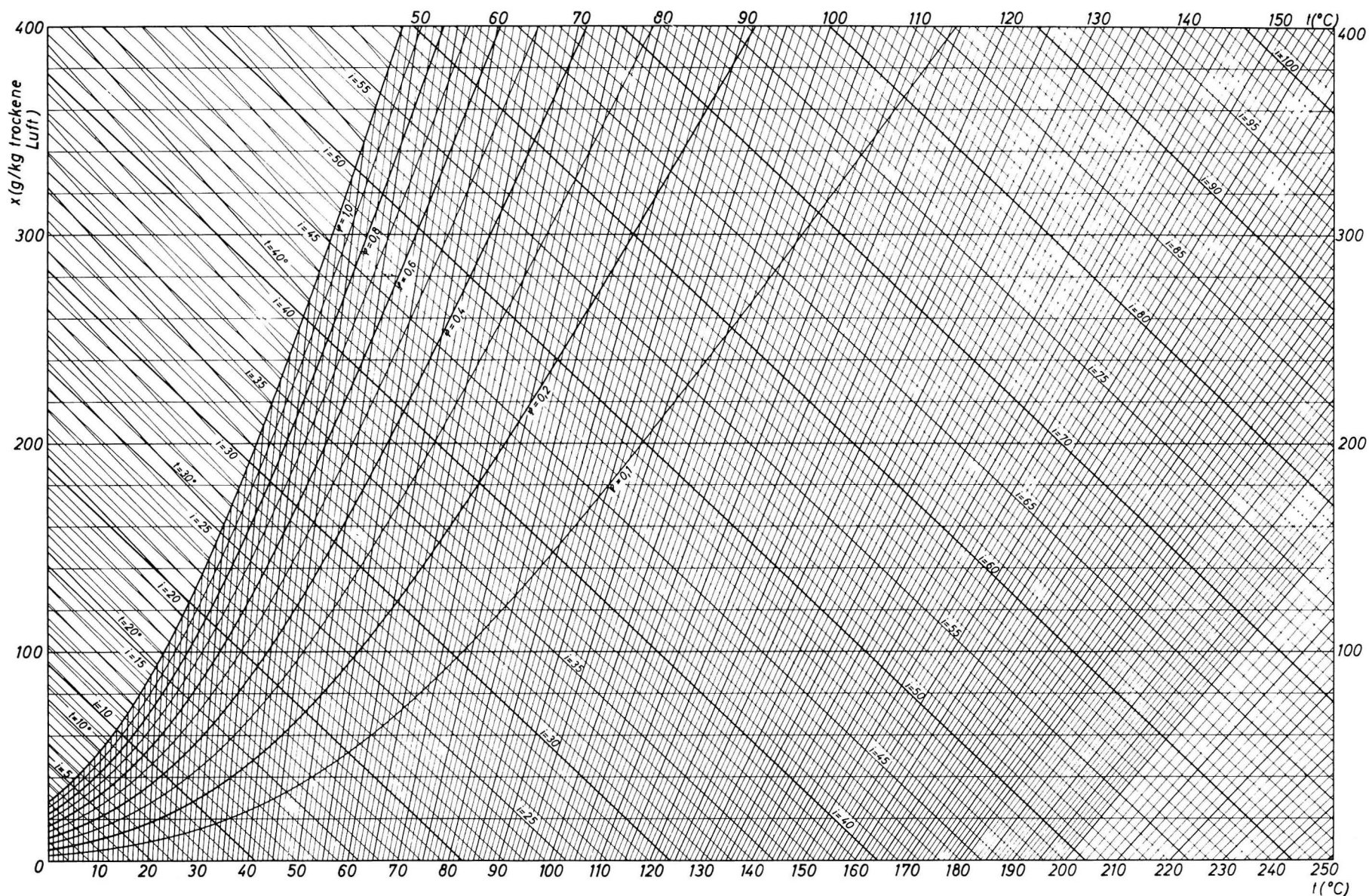


Bild 3 Maximal erreichbare Trockengeschwindigkeit für Toluolverdunstung in Abhängigkeit von der mittleren Luftgeschwindigkeit längs der Flüssigkeitsoberfläche mit der Oberflächentemperatur t_w als Parameter für eine kreisförmige Trockenfläche mit $D = 2$ m und einer runden Düse in senkrechter Anordnung.

50 kg/m²h. Sie sind etwa mit den in Bild 2 dargestellten Werten vergleichbar. Mit steigender Luftgeschwindigkeit steigt die Trockengeschwindigkeit ganz erheblich an. Beispielsweise ist die bei freier Konvektion beim Toluolsiedepunkt erreichbare Trockengeschwindigkeit von $g_D \approx 28 \text{ kg/m}^2\text{h}$ bereits bei der sehr niedrigen Oberflächentemperatur von 20°C und bei einer mittleren Luftgeschwindigkeit von etwa 60 m/s auch zu erreichen. Es ist also möglich, die Oberflächentemperaturen in gewünschten Grenzen zu halten, aber trotzdem mit der Erhöhung der Luftgeschwindigkeit die Trockengeschwindigkeit erheblich zu steigern.

Bild 3 zeigt aber auch, daß der Anstieg der Trockengeschwindigkeit umso steiler ist, je höher die Oberflächentemperatur gewählt wird. Die dargestellten Zusammenhänge ermöglichen, Trocknersysteme bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit miteinander zu vergleichen. Trocknersysteme, die ohne ausgeprägte Luftströmung arbeiten, wie beispielsweise Kontakttrockner, Trocknersysteme mit elektromagnetischen Wellen usw., sind trotz einer beträchtlichen Temperatursteigerung nicht in der Lage, eine hohe Trockengeschwindigkeit zu erreichen. Als Nebenprodukt, das mit Hilfe der zur Berechnung der Trockengeschwindigkeit gesammelten Stoffwerte für Toluol entstanden ist, fiel ein i-x-Diagramm für Toluol-Luftgemische an (Bild 4), das zur Verfolgung und Veranschaulichung von Trocknungsvorgängen bei toluolhaltigen Druckfarben nützlich ist.

Ein Hochleistungstrocknersystem ist offensichtlich nur mit höheren Luftgeschwindigkeiten möglich. Aus diesem Grunde wird im zweiten Teil dieses Berichtes über die Teilergebnisse einzelner Untersuchungen berichtet, die die Optimierung eines Hochleistungstrocknersystems - wie zum Beispiel Prallstrahl-trockner - zur Aufgabe haben.



i-x Diagramm für Toluol-Luftgemisch im Bereich von $0^{\circ}\text{C} \div 250^{\circ}\text{C}$
und $P=760\text{ mm Q.S.}$
 i (kcal/kg trockene Luft)

Institut für Druckmaschinen und
Druckverfahren, TH Darmstadt

Bild 4 *i-x* Diagramm für Toluol-Luftgemisch im Bereich von
 0°C bis 250°C und $P = 760\text{ mmQS}$

Das Diagramm ist in Heft 1/1969 in doppelter Größe wiedergegeben

Zur einwandfreien Optimierung eines Prallstrahltrockners ist eine Messung der örtlichen Stoffübergangszahl unter Berücksichtigung der verschiedenen Strömungsbedingungen und der geometrischen Verhältnisse notwendig. Die Stoffübergangszahl β ist nach folgender Gleichung definiert:

$$\text{Trockengeschwindigkeit } g_D = \frac{\beta}{R_D T} (P_{D_O} - P_{D_L}) \quad \text{kg/m}^2\text{h} \quad (1)$$

Dabei ist

β = Stoffübergangszahl m/h

R_D = Gaskonstante des Lösemitteldampfes mkp/kg⁰K

T = mittlere Temperatur in der Grenzschicht ⁰K

P_{D_O} = Partialdruck des Lösemitteldampfes an der Flüssigkeitsoberfläche kp/m²

P_{D_L} = Partialdruck des Lösemitteldampfes in der Luft kp/m²

Aus dem Aufbau der Gleichung (1) ist ersichtlich, daß bei gegebener Temperatur und Partialdruckdifferenz die Stoffübergangszahl β die Höhe der Trockengeschwindigkeit bestimmt.

Die Messung der örtlichen Stoffübergangszahl ist im allgemeinen sehr schwierig. Die dazu analoge Größe, die Wärmeübergangszahl α , ist meßtechnisch leichter zu erfassen. Beide Größen stehen aufgrund der Ähnlichkeitsgesetze in einer eindeutigen Beziehung.

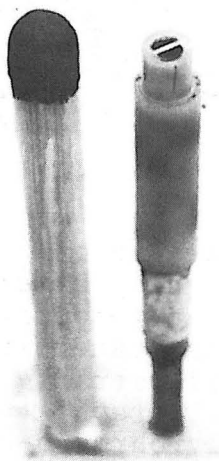


Bild 5

Wärmeflußgeber zur Messung der örtlichen Wärmeübergangszahlen.

Zur Messung der örtlichen Wärmeübergangszahl wurde ein Wärme-
flußgeber verwendet, der bündig in einer Platte eingebaut war.
Bild 5 zeigt den Wärmeflußgeber, der als Meßelement eine heiz-
bare Folie enthält. Zum Größenvergleich ist auch ein Streich-
holz abgebildet. Bild 6 zeigt die gesamte Versuchsanlage mit
den benutzten Meßgeräten. Das Gebläse G im Vordergrund ist mit
dem Düsenkasten DK über einen Diffusor DF verbunden. Am Aus-
tritt des Düsenkastens können verschiedene Düsenböden in
Einzel- oder Mehrdüsenanordnungen angeschraubt werden. Unter-
halb des Düsenkastens ist eine Plexiglasplatte P als senkrecht

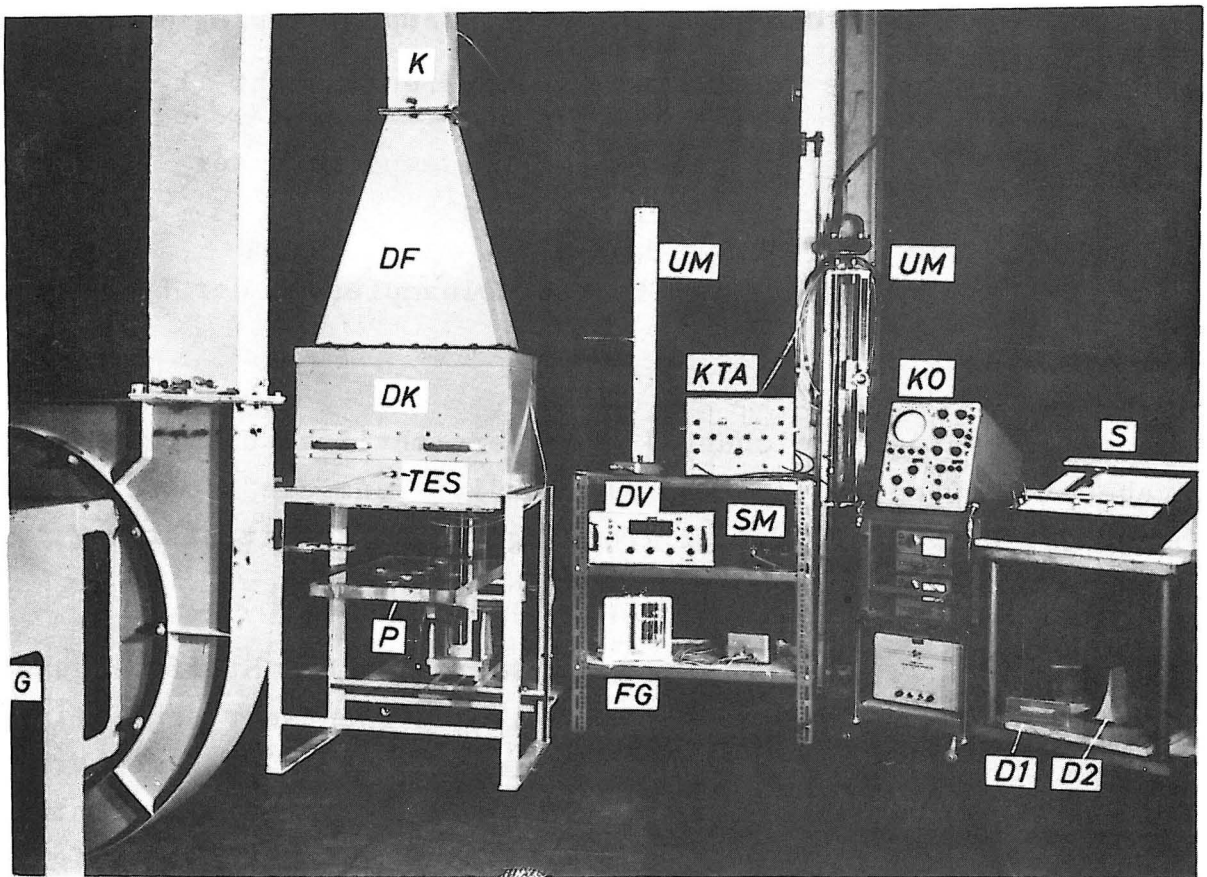


Bild 6 Versuchsanlage mit Meßgeräten:

G	= Gebläse;	DK	= Düsenkasten;
DF	= Diffusor;	P	= Plexiglasplatte;
DV	= Digitalvoltmeter;	KTA	= Konstanttemperatur- Hitzdrahtanemometer;
S	= x-y-Schreiber;	KO	= Kathodenstrahl- oszillograph;
D1	= Düsentyp 1;	SM	= Schrägrohrmano- meter;
D2	= Düsentyp 2;	UM	= V-Rohrmanometer;
FG	= Feuchtigkeitsmeßgerät	K	= Krümmer
TES	= Temperaturmeßstelle im Düsenkasten.		

angeströmte Platte auf einem massiven Stativ in drei Richtungen x , y , z verschiebbar angeordnet. Diese Platte simuliert die Papierbahn. Auf dem Tisch in der Mitte des Bildes ist das Hitzdraht-Anemometer KTA zu sehen, das im Prinzip eine sich automatisch abgleichende Wheatstone'sche Brücke ist. Der Geber ist in einen Ast der Brücke geschaltet und dient als Wärmequelle und Widerstandsthermometer zugleich. Die Temperatur der Heißfolie wird automatisch vom Anemometer konstant gehalten, so daß ihre Wärmeabgabe unter verschiedenen Strömungszuständen ein Maß für die örtliche Wärmeübergangszahl darstellt.

Die Ausgangsspannung des Anemometers, die zur Ermittlung der Wärmeübergangszahl benötigt wird, kann zusätzlich mit Hilfe eines fünfstelligen Digitalvoltmeters DV getrennt gemessen werden. Für die Turbulenzmessungen sowie für die richtige Einstellung des Gebers wurde ein Kathodenstrahloszillograph KO verwendet. Mit Hilfe eines x - y -Schreibers S, der auf der rechten Seite des Bildes zu sehen ist, kann mittels eines Weggebers die Ausgangsspannung des Anemometers als Profil aufgezeichnet werden. Auf der unteren rechten Bildhälfte ist ein Teil der verwendeten Düsen zu sehen. Diese Schlitzdüsen, die ursprünglich als Eichdüsen eingesetzt wurden, wurden jedoch zum Vergleich mit Mehrdüsenanordnungen auch für die Untersuchungen der Strömungs- und Wärmeübergangsvorgänge unter Einzeldüsenanordnungen benutzt. Im folgenden wird ausschließlich über diese Untersuchungen berichtet. Aus bestimmten Gründen, die mit der Eichung des Gebers zusammenhängen, mußten die Schlitzdüsen besonders turbulenzarm sein und verschiedene Breiten aufweisen. Diese Eichdüsen besitzen Wandprofile, die für eine adiabatische Expansion gerechnet wurden, wobei längs der Düsenachse ein konstantes Druckgefälle zugrunde gelegt wurde. Sie erfüllten die Bedingungen der geringen Turbulenz sehr gut. Es wurden zwei Typen gebaut: Düsentyp 1 für den bündigen Einbau in die Bodenplatte des Düsenkastens (Düsenhöhe 20 mm) und Düsentyp 2 mit einem langen Auslauf (Düsenhöhe 200 mm). Beide Düsentypen sind in Bild 7 dargestellt.

Bild 8 zeigt den Düsentyp 2 noch einmal in eingebautem Zustand als Einzeldüsenanordnung. Die freie Strahlausbreitung unter einer Düse von 15 mm Breite (Düsentyp 1) bei einer konstanten Düsenaustrittsgeschwindigkeit von $w_D = 48 \text{ m/s}$ ist in Bild 9 räumlich aufgezeichnet. Die gemessenen Geschwindigkeitsprofile unmittelbar am Düsenaustritt sind sowohl in x- als auch in y-Richtung bis zu den Rändern sehr gleichmäßig. Solche Messungen waren notwendig, um die Kernlänge des freien Strahles festzustellen. Unter Kernlänge wird das Verhältnis des Abstandes z' zur Düsenbreite B verstanden, bei dem die maximale Düsenaustrittsgeschwindigkeit in der Strahlachse gerade noch erhalten bleibt. In der Regel liegt die Kernlänge bei $z'/B = 4 \dots 5$. Die Kernlänge ist in erster Linie vom Turbulenzgrad des freien

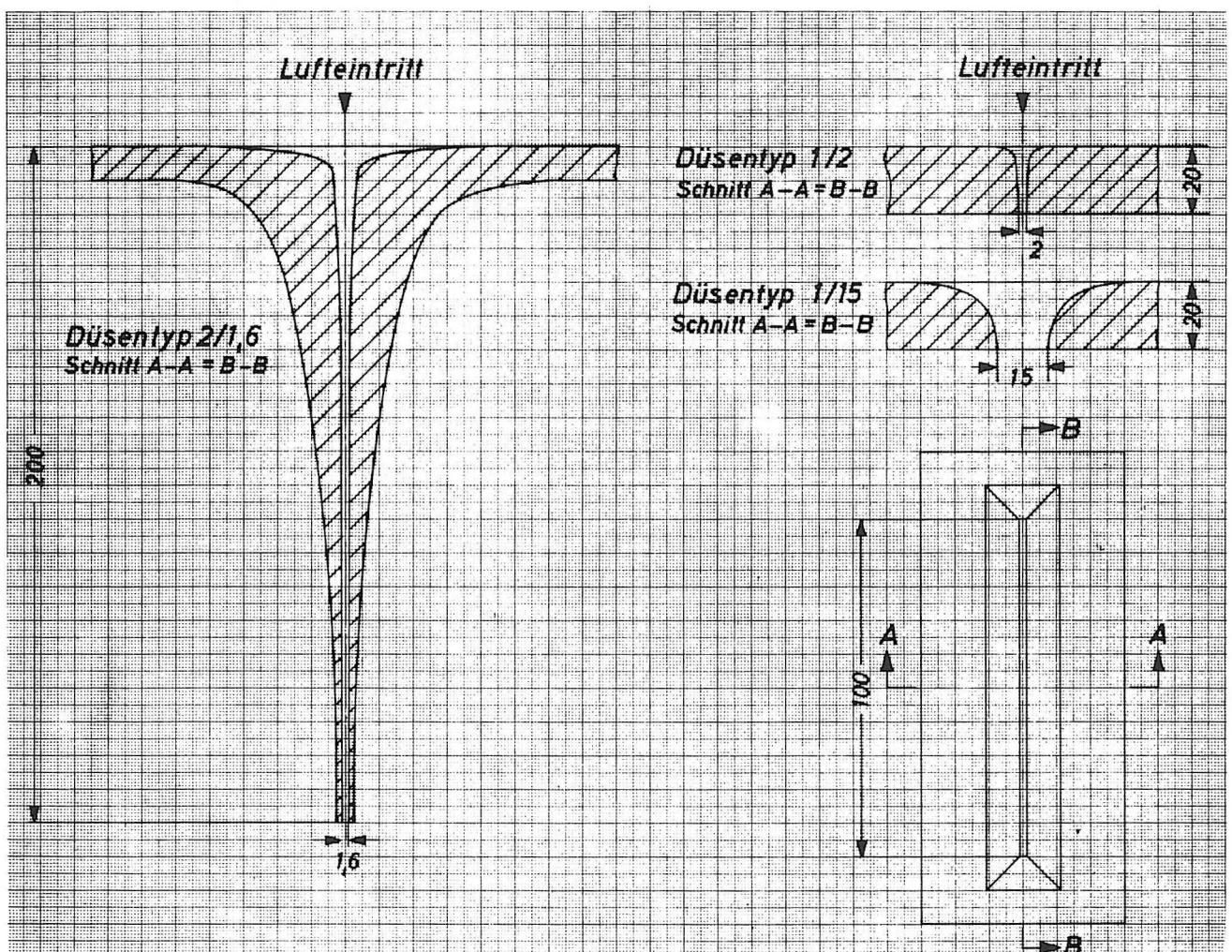


Bild 7 Verschiedene Schlitzdüsentypen
(Düsenaustrittslänge L für alle Düsen $L = 100 \text{ mm}$)

Strahles abhängig. Je stärker der Turbulenzgrad am Düsenaustritt ist, desto kleiner wird die Kernlänge. Durch die starke Mischung mit der Umgebungsluft wird nämlich eine vorzeitige Abnahme der maximalen Strahlgeschwindigkeit verursacht.

Bild 10 zeigt die Abhängigkeit der Geschwindigkeit w_{str} in der Strahlachse mit dem Abstand z' vom Düsenaustritt bei verschiedenen Düsenaustrittsgeschwindigkeiten w_D für die Düse Typ 1 nach Bild 7. Die Kernlänge bei dieser Düse liegt etwa bei $z'/B = 8$ und ist somit erheblich größer als die in der Praxis vorzufindenden Kernlängen.

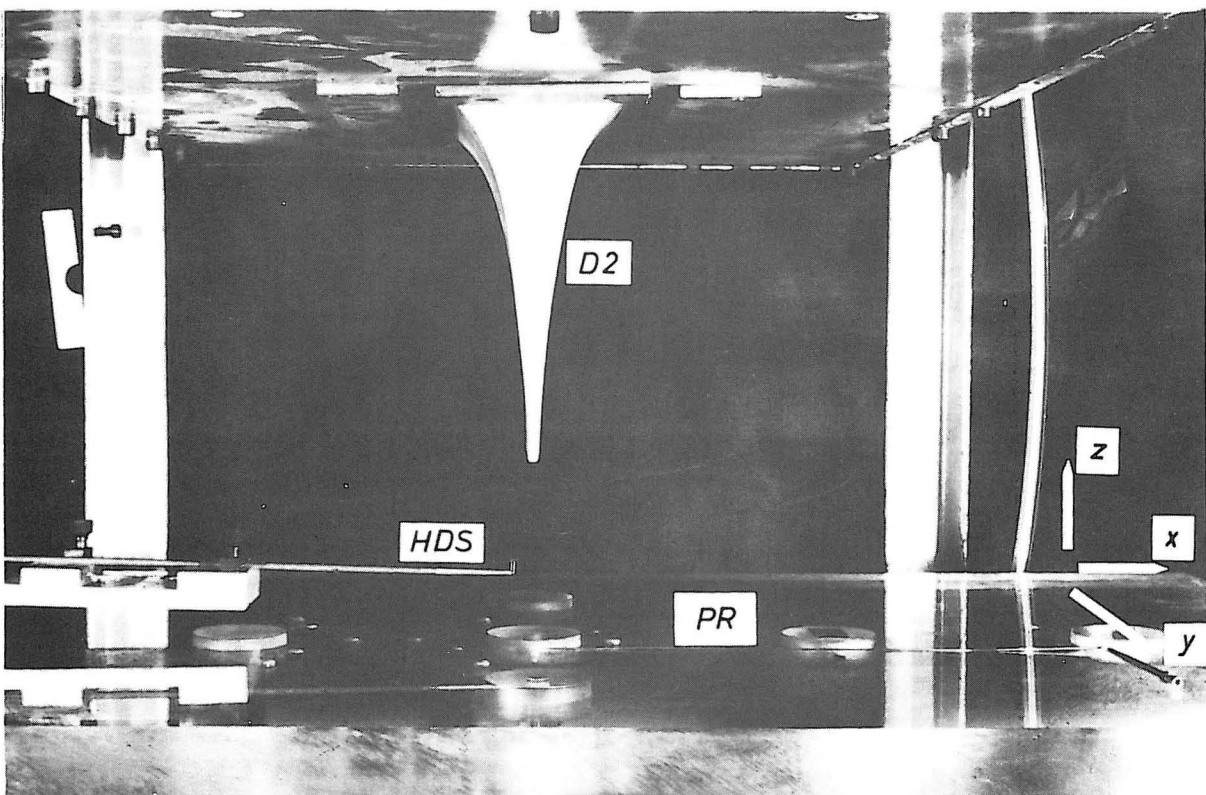


Bild 8 Düsentyp 2 als Einzeldüsenanordnung für eine senkrecht angeströmte Platte.

HDS = Hitzdrahtsonde, PR = Pitotrohr.

Die Düsenaustrittsgeschwindigkeit ist nicht unmittelbar ein Maß für diejenige Luftgeschwindigkeit, welche die Trocknung direkt beeinflusst. Für den Stoff- und Wärmeübergang ist vielmehr bei der senkrechten Anströmung der Fläche die wandparallele Geschwindigkeitskomponente in der Grenzschicht verantwortlich. Diese Geschwindigkeitskomponente ist abhängig von

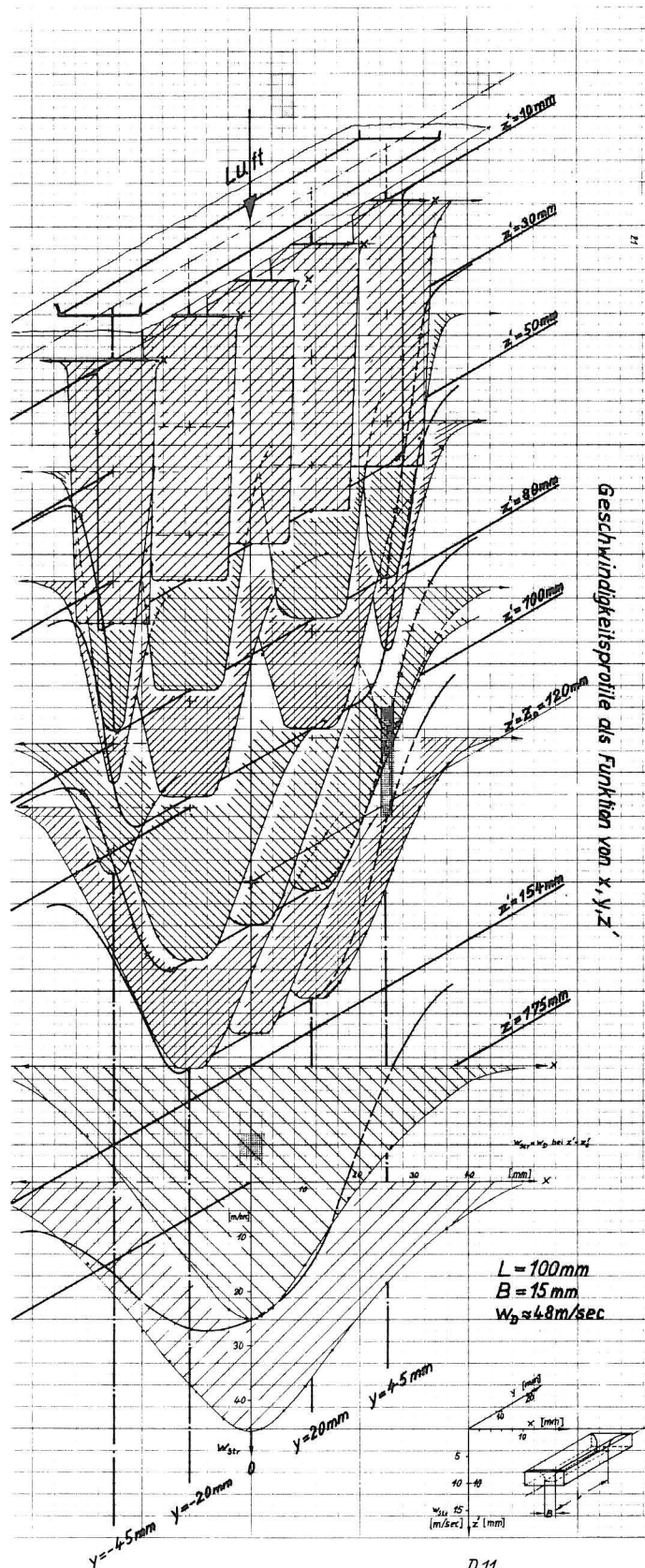


Bild 9 Geschwindigkeitsprofile unter einer Düse (Typ 1) in räumlicher Darstellung für eine Düsenaustrittsgeschwindigkeit $w_D = 48\text{ m/s}$.

der in der Mitte des freien Strahles vorhandenen maximalen Strahlgeschwindigkeit bei einem dem Düsenplattenabstand Z entsprechenden Abstand z' . Eine große Kernlänge ist deshalb von besonderer Bedeutung.

Für die Messung des Wärmeüberganges wurde die in den Bildern 8 und 11 gezeigte Meßanordnung gewählt. Bild 11 zeigt in einem Bildausschnitt unter dem Düsenkasten die bündig eingebaute Düse Typ 1, eine Staudrucksonde SDS zur Messung der Düsenaustrittsgeschwindigkeit und eine Hitzdrahtsonde HDS zur Messung der Turbulenz. Auf Bild 12 ist die Platte P mit den bündig eingebauten Wärmeflußgebern WFG zu sehen. Die Platte ist an verschiedenen Stellen mit einsteckbaren Buchsen versehen, die verschiedene Wärmeflußgeber sowie zum Beispiel Meßanschlüsse für den statischen Druck enthalten können.

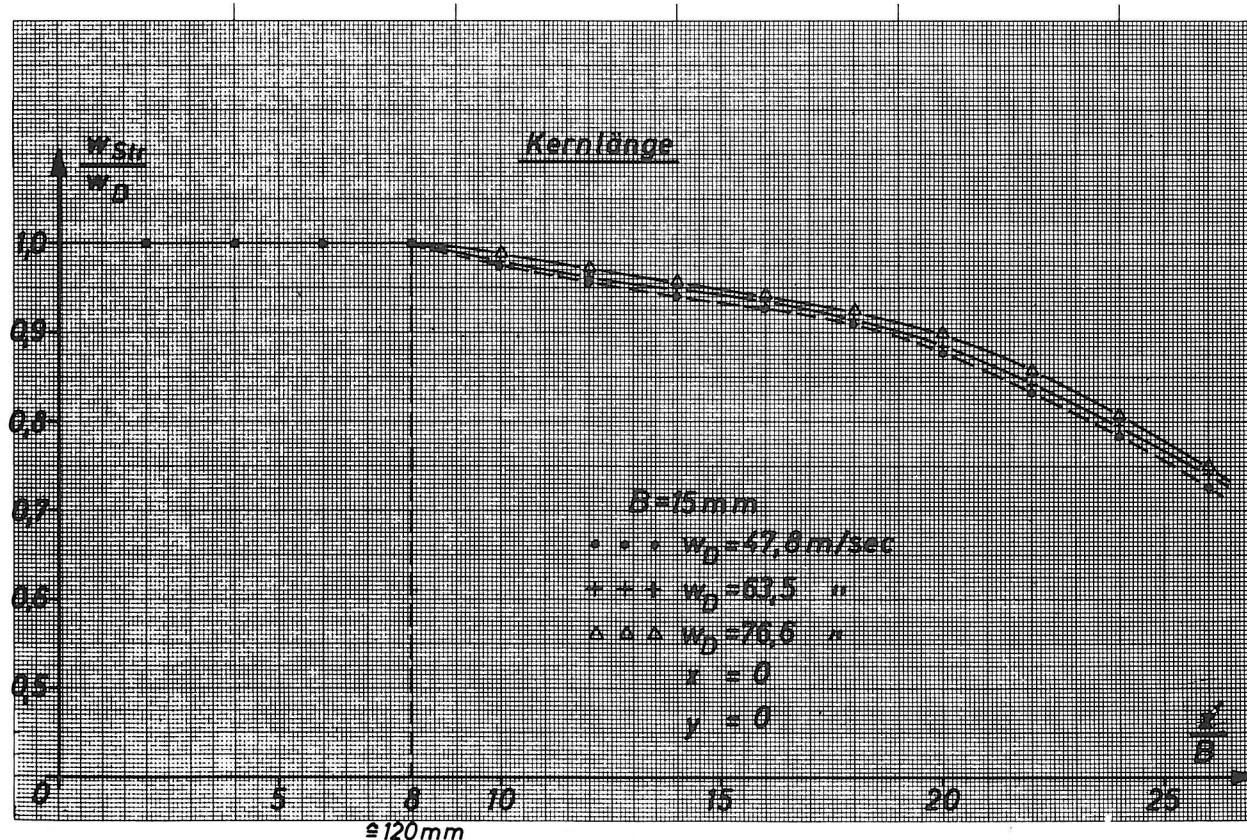


Bild 10 Kernlänge einer Schlitzdüse (Typ 1, Düsenbreite $B = 15 \text{ mm}$) in der Strahlachse bei verschiedenen Düsenaustrittsgeschwindigkeiten.

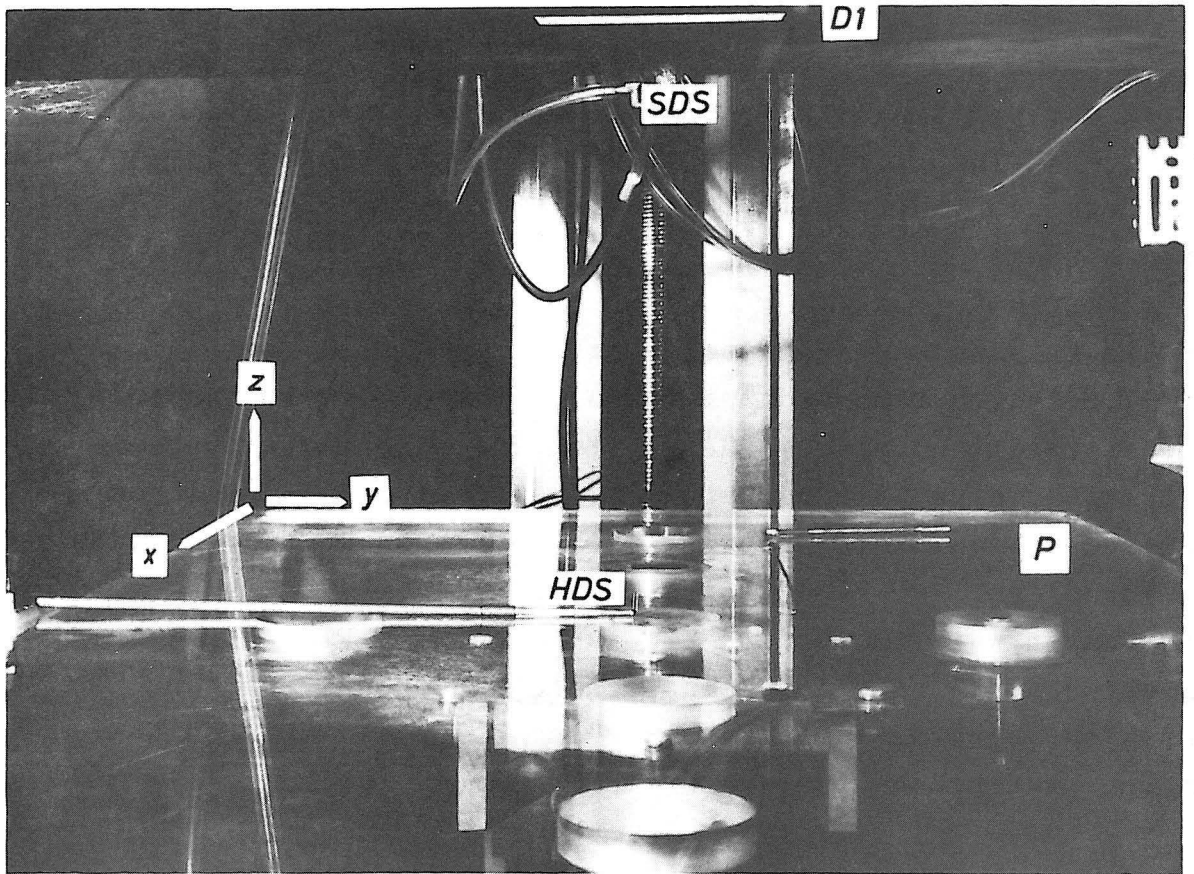


Bild 11 Düsentyp 1 als Einzeldüsenanordnung für eine senkrecht angeströmte Platte.

SDS = Staudrucksonde, HDS - Hitzdrahtsonde.

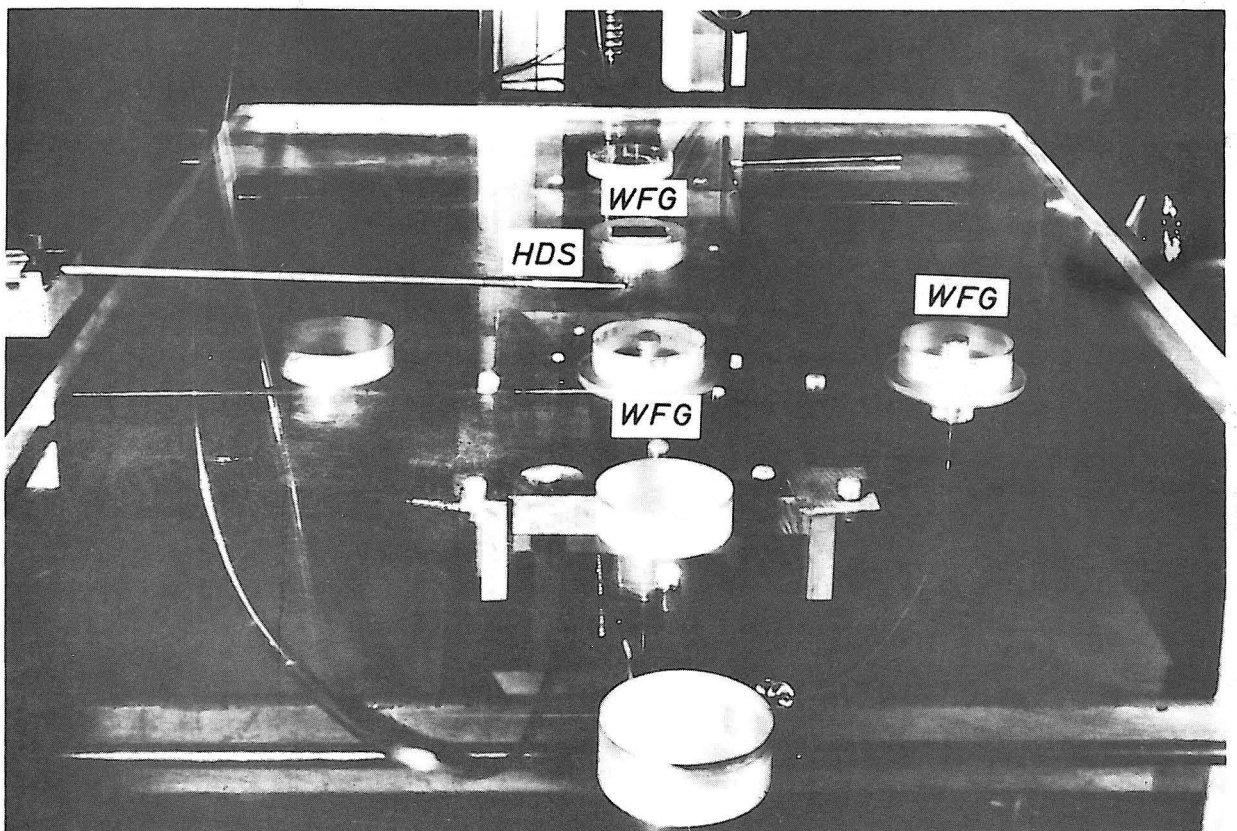


Bild 12 Senkrecht angeströmte Platte P mit bündig eingebauten Wärmeflußgebern WFG.

Obwohl die örtliche Wärmeübergangszahl im Staupunkt selbst nicht von großer Bedeutung für die mittlere Wärmeübergangszahl ist, so ist die Kenntnis ihrer Abhängigkeit vom Abstand Z und von der Geschwindigkeit w_D erwünscht. Bild 13 zeigt diese für eine Düse Typ 1 mit der Austrittsbreite $B = 15 \text{ mm}$. Beim Betrachten des Diagrammes fallen die ungewöhnlich hohen Werte für die Wärmeübergangszahl auf. Die effektive Wärmeübergangszahl ist tatsächlich kleiner. Eingehende Untersuchungen haben gezeigt, daß im Staupunkt ein fester Eichfaktor $C_1 \approx 13^*$ gültig ist. Man erhält die effektive Wärmeübergangszahl α_{eff} , indem die vom Gerät angezeigte Wärmeübergangszahl α_{Gstr} durch C_1 dividiert wird. Der Eichfaktor

ist in erster Linie von den Abmessungen der Heißfolie abhängig. Aus Messungen an Heizdrähten kleiner Dimension sind ähnliche Verhaltensweisen bekannt. Wird wie in Bild 13 auf der Abzisse der Wurzelwert der Düsenaustrittsgeschwindigkeit aufgetragen, so stellen sich die Meßkurven als Geraden dar. Das bedeutet, daß die Wärmeübergangszahl proportional der 0,5ten Potenz der Düsenaustrittsgeschwindigkeit ist und damit den Gesetzmäßigkeiten für eine laminare Grenzschicht folgt. Es gilt also folgende Gleichung

$$\alpha_{\text{eff}} = \frac{\alpha_{\text{Gstr}}}{C_1} \cdot K \cdot w_D^{0,5} \quad (2)$$

Das Diagramm zeigt zudem, daß α_{eff} ebenfalls vom Plattenabstand abhängig ist, ohne über diese Abhängigkeit erschöpfend Auskunft zu geben. In Bild 14 wird auf diese Abhängigkeit besonders eingegangen. Es zeigt sich, daß bei einer gegebenen Geschwindigkeit zwei Maxima für die örtliche Wärmeübergangszahl auftritt. Im gewählten Beispiel - etwa bei $Z/B = 0,5$ und $Z/B = 21$. Welches der beiden Maxima das höhere ist, hängt vom Turbulenzgrad der Düsenströmung ab. Bei Turbulenzarmut ist das zweite Maximum das höhere. Bei sehr turbulenten Strömungen ist jedoch das erste Maximum das höhere. Das zweite Maximum bleibt etwa erhalten, weil der Abfall der Wärmeübergangszahl als Folge der verkürzten Kernlänge durch die erhöhte

* Ein endgültiger Zahlenwert kann erst später angegeben werden

Turbulenz wettgemacht wird. Wie aus Messungen Dritter, zum Beispiel Gardon und Akfirat [5] hervorgeht, verschiebt sich jedoch das zweite Maximum zu kleineren Werten von Z/B . Auch diese Zusammenhänge weisen auf die große Bedeutung einer turbulenzarmen Düse mit großer Kernlänge hin. Die Benutzung des ersten Maximums verbietet sich in der Druckmaschine wegen des damit verbundenen geringen Abstandes zwischen Düsenaustritt und Bedruckstoff. Auch das zweite Maximum soll bei einem möglichst großen Z -Wert auftreten, damit eine hohe Betriebssicherheit der Rotationsmaschine erreicht wird. Dadurch wird die Bedeutung der Kernlänge weiter unterstrichen

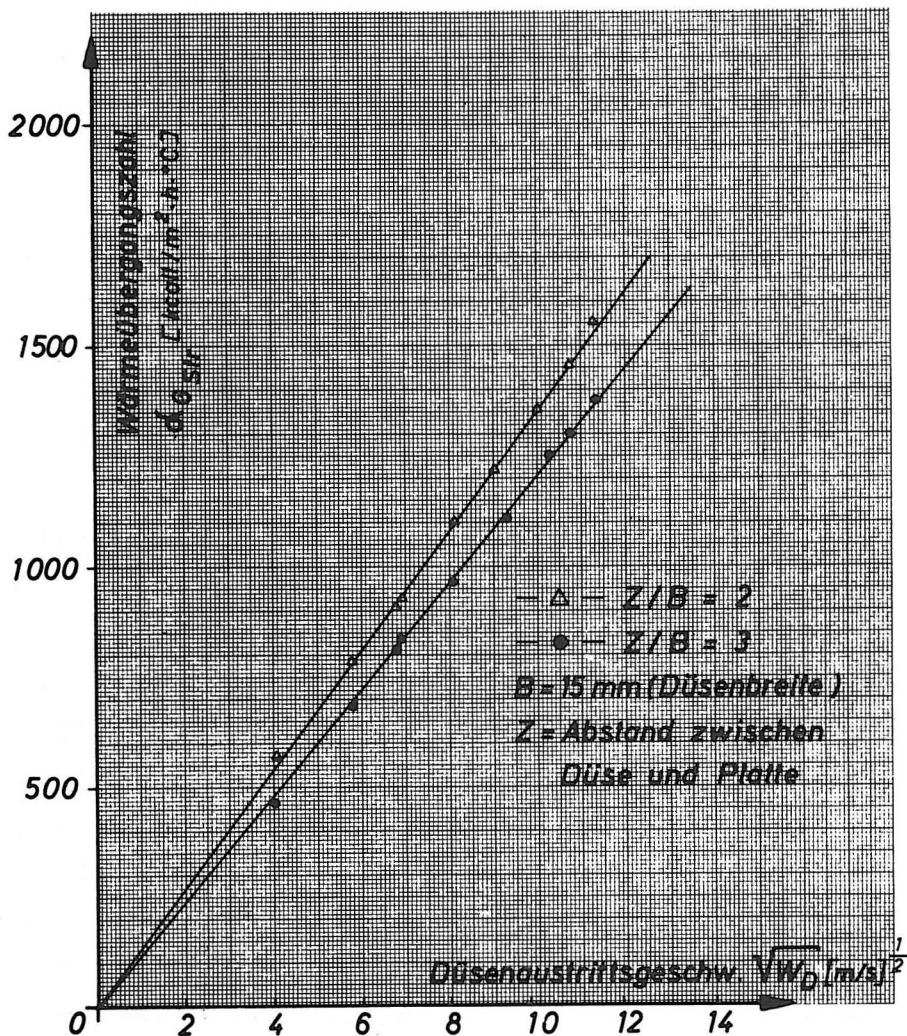


Bild 13 Abhängigkeit der im Staupunkt gemessenen Wärmeübergangszahl $\alpha_{Gstr.}$ von der Düsenaustrittsgeschwindigkeit für verschiedene Plattenabstände.

Von besonderem Interesse sind selbstverständlich die örtlichen Wärmeübergangszahlen längs der Oberfläche (in x-Richtung). Bild 15 zeigt deren Verläufe für die beiden Düsentypen. (Kurve 1: Düsentyp 2; Kurven 2 und 3: Düsentyp 1).

Hierbei betrug die Düsenaustrittsgeschwindigkeit für alle Messungen $w_D \approx 48,6$ m/s. Auf der Ordinate ist die vom Geber gemessene Wärmeübergangszahl α'_{Gstr} aufgetragen. Um den Verlauf der effektiven Wärmeübergangszahl $\alpha_{eff.}$ zu erhalten,

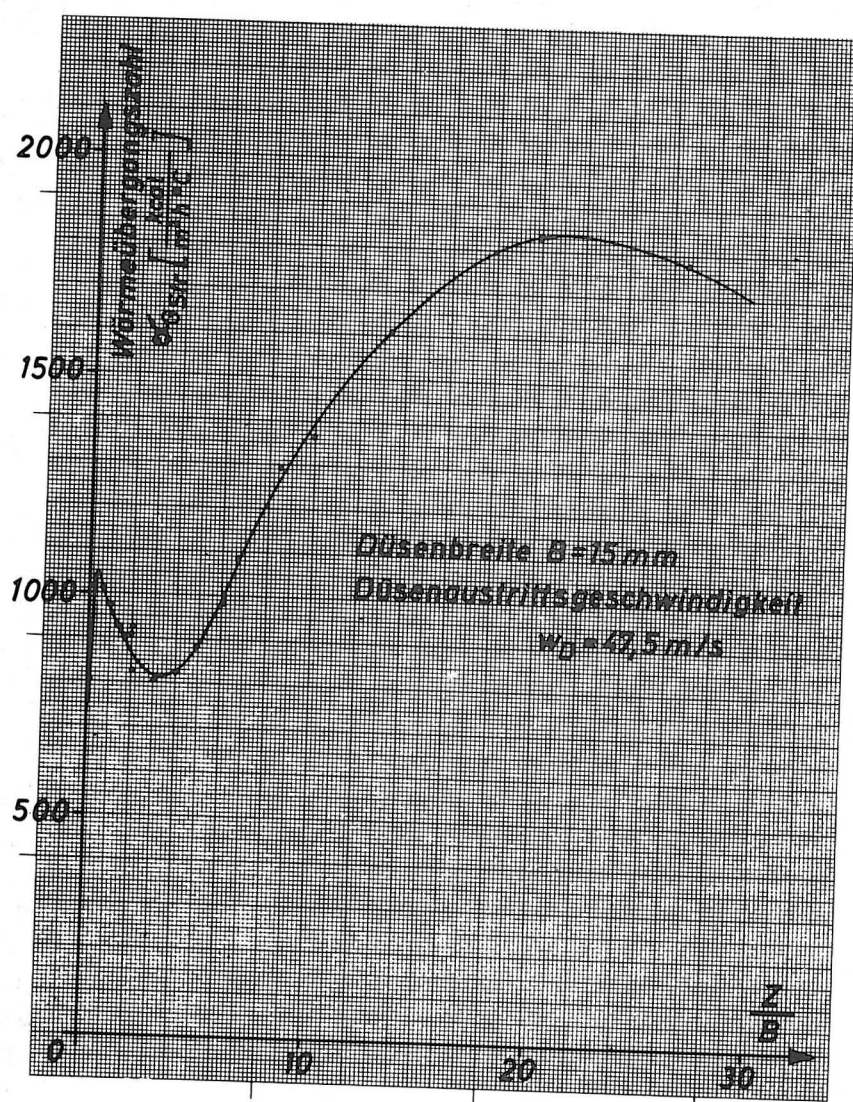


Bild 14 Abhängigkeit der im Staupunkt gemessenen Wärmeübergangszahl $\alpha'_{Gstr.}$ von dem dimensionslosen Plattenabstand Z/B bei einer konstanten Düsenaustrittsgeschwindigkeit.

müssen die $\alpha_{\text{Gstr.}}$ - Werte wieder durch einen Eichfaktor dividiert werden. Ob dieser Eichfaktor über die ganze Plattenlänge dem aus der Eichung im Staupunkt ermittelten Eichfaktor C_1 entspricht oder bei ganz großen Plattenlängen aufgrund der turbulent werdenden Strömung ein anderer Eichfaktor zugrunde gelegt werden muß, ist noch Gegenstand weiterer Untersuchungen. Die Entfernung vom Staupunkt wurde durch Beziehen auf die Düsenbreite B dimensionslos gemacht, um die Kurven besser miteinander vergleichen zu können.

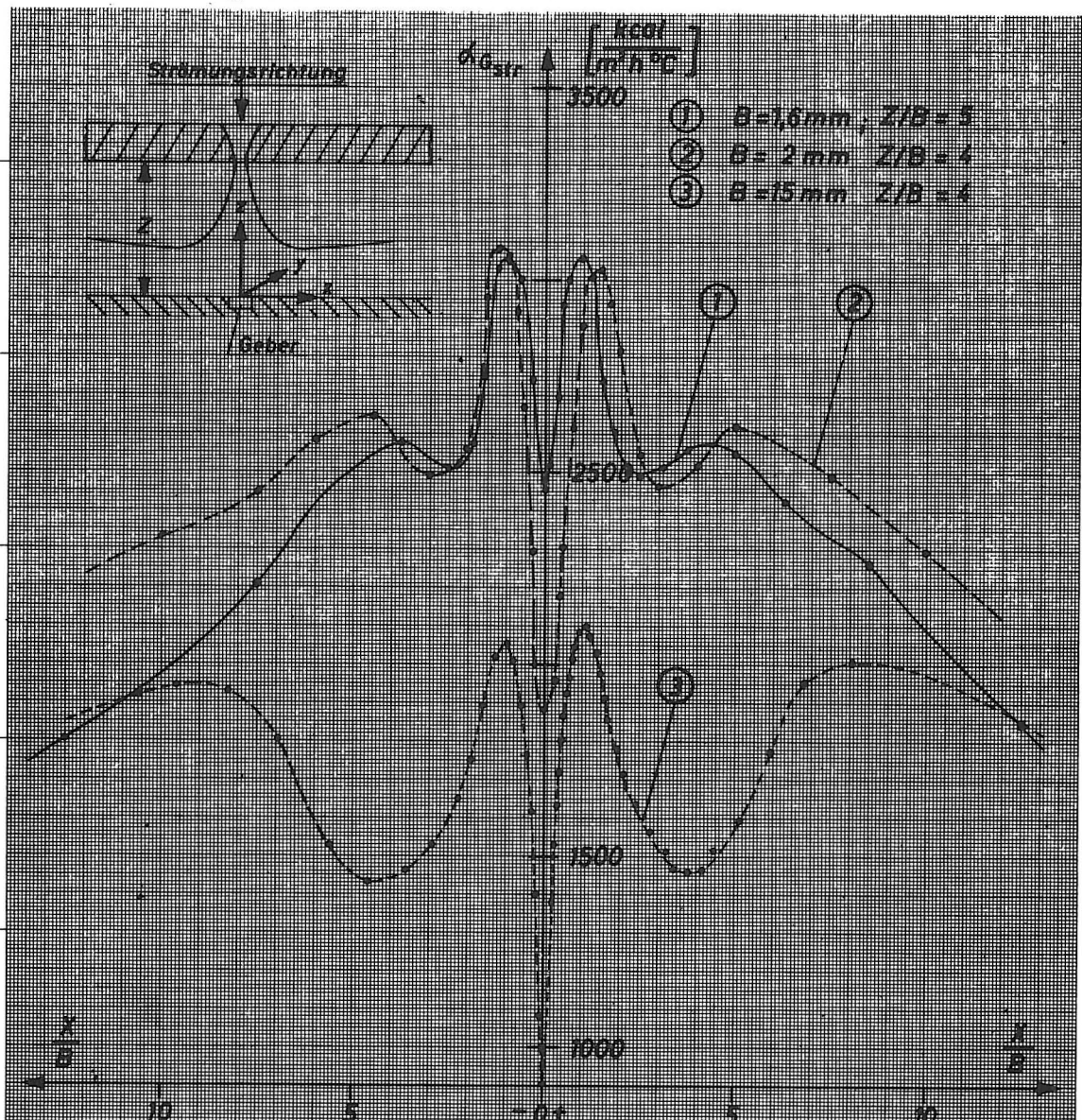


Bild 15 Verlauf der gemessenen örtlichen Wärmeübergangszahl $\alpha_{\text{Gstr.}}$ in Abhängigkeit von dem dimensionslosen Staupunktabstand x/B unter verschiedenen Schlitzdüsen bei einer konstanten Düsenaustrittsgeschwindigkeit von $w_D \approx 48,6 \text{ m/s}$. ①: Düsentyp 2; ② und ③: Düsentyp 1

Bei Betrachtung dieser Kurven fällt zunächst auf, daß die örtlichen Wärmeübergangszahlen über dem dimensionslosen Staupunktabstand x/B starke Schwankungen aufweisen. Die Kurven zeigen an zwei Stellen Maxima. Kleinere Düsenbreiten liefern bei ungefähr gleichen Z/B -Werten insgesamt höhere Wärmeübergangszahlen.

Alle Kurven weisen in dem untersuchten Bereich von Z/B im Staupunkt eine minimale Wärmeübergangszahl auf. Dank der kleinen Abmessungen der Heißfolie in Strömungsrichtung (Folienbreite 0,2 mm) kann selbst bei kleinsten Düsenbreiten von einer örtlichen Messung gesprochen werden. Bei älteren Messungen war die aktive Meßbreite der verwendeten Geber meistens in der Größenordnung von der Düsenbreite, so daß das Minimum im Staupunkt wahrscheinlich nicht erfaßt wurde. Diese Messungen - zum Beispiel von Gardon und Akfirat [5] - zeigen durchweg ein Maximum für die Wärmeübergangszahl. Es sei hier ohne Wiedergabe der Meßergebnisse vermerkt, daß mit der Vergrößerung des Abstandes Z , das Minimum im Staupunkt sich immer mehr füllt und schließlich dann doch zu einem Maximum wird.

Ein grundsätzlicher Unterschied zwischen den Verläufen der Kurven 1 und 2 in Bild 15 und damit zwischen den beiden Düsentypen ist nicht festzustellen. Dies bedeutet aber, daß eine bündig eingebaute Düse (Typ 1) als Einzeldüse genauso gut eingesetzt werden kann wie der Typ 2 und wegen ihrer geringen Höhe zudem noch den Vorteil bietet, platzsparend zu bauen. Bei Mehrdüsenanordnungen wird jedoch mit Vorteil die Düse Typ 2 eingesetzt, da für die Abfuhr der Luft der Raum zwischen den Düsenkonturen sehr zustatten kommt.

Zusammenfassung:

Mit Hilfe der bekannten theoretischen Ansätze für den Verdunstungsvorgang von Flüssigkeiten wurde der Einfluß der Temperatur und der Luftgeschwindigkeit auf die Trockengeschwindigkeit als Beispiel bei der Toluolverdunstung ermittelt. Eine

grundsätzliche Bewertung der verschiedenen Trocknersysteme ist damit möglich. Als Nebenprodukt bei den Berechnungen ist auch ein i - x -Diagramm für Toluol-Luftgemisch entstanden.

Im Hinblick auf die Optimierung der leistungsfähigen Luftumwälzungstrocknersysteme wird anhand von örtlichen Wärmeübergangsmessungen gezeigt, wie sich die Änderung der Luftgeschwindigkeit, der Düsenbreite und des Plattenabstandes auf die Wärmeübergangszahl und über die damit gekoppelte Stoffübergangszahl auf die Trockengeschwindigkeit auswirkt.

Die dargestellten Ergebnisse beantworten noch nicht alle Fragen, zeigen jedoch ausdrücklich, daß bisher der Düsenform viel zu wenig Beachtung geschenkt worden ist.

Dipl.-Ing. Günay Dosdogru, TH Darmstadt

Literatur

- [1] Schrader, H., Trocknung feuchter Oberflächen mittels Warmluftstrahlen. Strömungsvorgänge und Stoffübertragung. VDI-Forschungsheft 484 (1961)
- [2] Schlünder, E.V. und Gnielinski, V., Wärme- und Stoffübertragung zwischen Gut und aufprallendem Düsenstrahl. Chem.-Ing.-Techn., Heft 9/10 (1967) S. 578/584
- [3] Petzold, K., Der Wärmeübergang an einer senkrecht angeströmten Platte. Wiss. Zeitschr., Techn. Universität Dresden 13(1963) 4.4, S. 1157/1161
- [4] Perry, K.P., Heat Transfer by Convection from a Hot Gas Jet to a Plane Surface. Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 168(1954) S. 775/780
- [5] Gardon, R. und Akfirat, C., The Role of Turbulence in Determining the Heat-Transfer Characteristics of Impinging Jets. Int. J. Heat Mass Transf. Vol. 8(1965), S. 1261-1272